

基于虚拟阻抗的双馈风力发电机 高电压穿越控制策略

谢震, 张兴, 杨淑英, 宋海华, 曲庭余

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽省 合肥市 230009)

High Voltage Ride-through Control Strategy of Doubly Fed Induction Wind Generators Based on Virtual Impedance

XIE Zhen, ZHANG Xing, YANG Shuying, SONG Haihua, QU Tingyu

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China)

ABSTRACT: Grid voltage swell will cause transient DC flux component in the doubly fed induction generator (DFIG) stator windings, causing more serious stator and rotor current and torque oscillation even than voltage dip. This paper analyzed the dynamic behavior of DFIG during voltage swell. Based on the above analysis, the virtual resistance control strategy manages effective to suppress the rotor current and torque oscillation, but it can lengthen oscillation transient time of the rotor current during the voltage swell, and can result in higher rotor voltage than the conventional control. This paper proposed a virtual impedance control strategy to enhance its high voltage ride through (HVRT) capability, which can shorten the rotor oscillation process and suppress the high frequency component. Simulation and experimental results verify the effectiveness of the control strategy.

KEY WORDS: wind power generation; doubly fed induction generator (DFIG); virtual impedance; high voltage ride through (HVRT)

摘要: 电网电压骤升故障会造成双馈感应发电机定子绕组中产生定子磁链的暂态直流分量, 甚至引起比电网电压跌落更强的双馈发电机定、转子电流和电磁转矩的冲击。首先分析电网电压骤升下双馈发电机转子电流的电磁过渡过程, 在变流器转子电流环中引入虚拟电阻控制, 虽然能够有效抑制转子电流和电磁转矩的振荡, 但是会引起转子电压过高和转子电流振荡过程加长, 仅在低频部分具有抑制作用, 因此本文

引入虚拟电感, 形成虚拟阻抗的改进控制策略, 缩短了电网电压骤升时的转子振荡过程, 并且对高频部分具有较强的抑制作用, 提高了系统的高电压穿越性能。仿真和实验结果验证了所提控制策略的有效性和可行性。

关键词: 风力发电; 双馈感应发电机; 虚拟阻抗; 高电压穿越

0 引言

近年来, 双馈感应发电机(doubly fed induction generator, DFIG)^[1-3]在风力发电系统中得到广泛应用。为了适应电网导则的要求, 双馈风力发电机组必须具有低电压穿越的能力^[4-11], 但是电网电压骤升对其影响以及相应的高电压穿越(high voltage ride through, HVRT)技术研究较少。而在实际风电场系统中, 当电网电压跌落发生时, 风电场无功补偿装置电容器的投切, 造成系统无功过剩, 在电网电压恢复时刻常引起电网电压迅速骤升, 对风电机组造成了二次危害。2011年甘肃某风电场在低电压故障结束后, 由于电网内无功补偿装置因不具备自投切功能, 造成局部电网无功过剩、电压抬高, 使部分机组因高电压保护动作切除, 导致第二批风电机组脱网, 数量甚至超过了低电压脱网过程中的风电机组数量。类似事故在2011年发生了多次, 对电网安全影响较大^[12]。随着风力发电装机容量的不断扩大和并网准则完善, 具有高电压穿越能力也会逐步成为对风电场的必然要求。澳大利亚率先制定了真正意义上的并网风力发电机的高电压穿越准则^[13]: 当高压侧电网电压骤升至额定电压的130%时, 风电机组应维持60 ms不脱网, 并提供足够大

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077034); 国家青年科学基金项目(51107025); 安徽省高校自然科学基金项目(2011AJZR0063)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51077034); Scientific Funds for Young Scientists of China (51107025); Natural Science Research Project of Anhui province college (2011AJZR0063).

的故障恢复电流。

实现双馈风力发电机 HVRT 的方法有以下几种。文献[14]在电网电压骤升时采用动态电压恢复器,通过补偿正常和故障情况下的电压差值,来维持发电机电网入线端的电压不变;文献[15]在电网电压骤升时采用静止同步无功补偿器,主要是通过控制注入电网的无功电流迫使电网电压下降。显然这两种方案由于增加了成套的硬件系统,而使成本大幅增加。文献[16]在变流器直流侧增加斩波电路,抑制电网电压骤升导致网侧变流器能量逆向流动而引起的变流器直流侧电压上升。从而实现了故障时的控制解耦。文献[17]提出一种直流电压的柔性控制策略,直流电压的参考值随着网侧电压变化而变化,减少了变流器的功率损耗。文献[18]针对电网电压对称骤升采用一种转子变阻尼的控制策略,虽然能够抑制电网电压骤升时转子电流的振荡,但是会引起转子电压过高,转子电流的过渡过程加长,仅在低频部分具有较强的抑制作用。

针对上述问题,本文首先对电网电压骤升下双馈发电机的转子电流电磁暂态过程进行分析,在此基础上提出基于虚拟阻抗的改进控制策略。从而在抑制电网电压骤升下转子过电压的同时,最大限度地抑制了转子过电流,缩短了转子电流的过渡过程,不仅在低频部分具有较强的扰动抑制作用,而且在高频部分也具有较强的扰动抑制作用,提高了双馈风力发电机的 HVRT 性能。仿真和实验结果证明了所提方案的可行性。

1 电网电压对称骤升时转子电流暂态分析

将双馈发电机转子侧参数归算到定子侧^[19],并采用电动机惯例,双馈发电机等效模型如图 1 所示。

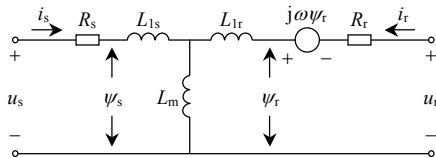


图 1 双馈发电机等效模型电路

Fig. 1 DFIG equivalent circuit

电网电压对称骤升下定子磁链中会产生直流分量,该分量并不旋转,且随着定子磁链时间常数而衰减,电网电压骤升前后定子磁链如下:

$$\psi_s(t) = \begin{cases} \psi_{s0} = U_{s0} / j\omega_s \\ \psi_{s2} + (\psi_{s0} - \psi_{s2})e^{-\sigma t}e^{-j\omega_s t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ_{s0} 和 U_{s0} 为电网电压骤升前的定子磁链和定子电压; ψ_{s2} 为电网电压骤升后稳态的定子磁链。

由式(1)可知:电网电压对称骤升下定子磁链可分成两部分,一部分是电网电压骤升后的稳态磁链,另一部分是定子磁链的衰减项,该项保证了电网电压对称骤升下定子磁链的连续。

若忽略电阻项,转子感应电动势为:

$$E(t) = \frac{L_m}{L_s} [j\omega_{sl}\psi_{s0} - j\omega_{sl}(\psi_{s0} - \psi_{s2})\varepsilon(t) - j\omega_r(\psi_{s0} - \psi_{s2})e^{-\sigma t}e^{-j\omega_s t}\varepsilon(t)] \quad (2)$$

电网电压对称骤升后,转子感应电动势中第一项是稳态的定子磁链感应的,由于其与转差频率成正比,幅值很小。转子感应电动势中第二项、第三项均是在电网电压骤升下所感应的,其中第三项在同步旋转坐标系中为振荡衰减项。

考虑转子变流器电流环控制时转子电流动态方程如下:

$$p^2 I_r + (\alpha_c + \alpha_s)pI_r + \alpha_c \alpha_s I_r = pE \quad (3)$$

式中: α_c 为转子电流闭环带宽, α_s 为转子电流环被控对象带宽; pE 为

$$pE = \frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \frac{L_m}{L_s} [j\omega_s(\psi_{s0} - \psi_{s2})\delta(t) + \omega_r \omega_s (\psi_{s0} - \psi_{s2})e^{-\sigma t}e^{-j\omega_s t}\varepsilon(t)]$$

对应的转子电流分量可分解成以下 3 部分。

$$I_r = I_{r1} + I_{r2} + I_{r3} \quad (4)$$

I_{r1} 是 pE 中的第 1 项所对应的,由式(3)可得:

$$I_{r1} = \frac{1}{\sigma L_r} \frac{L_m}{L_s} \frac{j\omega_s}{\alpha_c - \alpha_s} (\psi_{s0} - \psi_{s2}) (e^{-\alpha_s t} - e^{-\alpha_c t}) \quad (5)$$

I_{r2} 是 pE 中的第 2 项所对应的,由式(3)可得:

$$I_{r2} = \frac{N}{a^2 + b^2} (a - jb) \left(\frac{\sigma + j\omega_s - \alpha_c}{\alpha_c - \alpha_s} e^{-\alpha_s t} - \frac{\sigma + j\omega_s - \alpha_s}{\alpha_c - \alpha_s} e^{-\alpha_c t} + e^{-\sigma t} e^{-j\omega_s t} \right) \quad (6)$$

式中:

$$N = \frac{1}{\sigma L_r} \frac{L_m}{L_s} \omega_r \omega_s (\psi_{s0} - \psi_{s2})$$

$$a = [\sigma^2 - \omega_s^2 - \sigma(\alpha_c + \alpha_s) + \alpha_c \alpha_s]$$

$$b = 2\sigma\omega_s - \omega_s(\alpha_c + \alpha_s)$$

对应的转子侧电流自然振荡响应分量为

$$I_{r3} = \frac{\alpha_c e^{-\alpha_s t} - \alpha_s e^{-\alpha_c t}}{\alpha_c - \alpha_s} I_{r0} \quad (7)$$

2 基于虚拟阻抗的双馈发电机 HVRT 控制

2.1 双馈发电机系统稳定性分析

为了抑制 HVRT 过程中双馈发电机的振荡及其对双馈系统的冲击,可采用基于虚拟阻抗的控制策略。

以双馈发电机的转子电流为状态变量,转子电压为输入量,则关于双馈发电机转子电流的状态方程可表述为

$$p \begin{bmatrix} i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_k} & -\frac{\omega_{sl} L_r}{L_k} \\ \frac{\omega_{sl} L_k}{L_r} & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_k} \\ \frac{1}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{rq} \\ u_{rd} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)不难求出其特征方程:

$$s^2 + \frac{R_r}{L_r} s + \frac{R_r}{L_k} s + \frac{R_r^2}{L_k L_r} + \omega_{sl}^2 = 0 \quad (9)$$

式中 $L_k = L_r - L_m^2 / L_s$ 。

阻尼系数 ξ 和自然振荡频率 ω_n 分别为

$$\begin{cases} \xi = \left(\frac{R_r}{L_r} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) \frac{1}{2 \sqrt{\frac{R_r^2}{\sigma L_r L_r} + \omega_{sl}^2}} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{R_r^2}{\sigma L_r L_r} + \omega_{sl}^2} \end{cases} \quad (10)$$

当电网电压发生骤升时,发电机转子侧电流容易产生振荡,由式(10)可以发现:随着转子电阻的增加,发电机转子侧的阻尼系数也随之增加,为此可考虑增加系统阻尼^[20]的控制方案。

2.2 虚拟阻抗控制策略

引入虚拟电阻的双馈发电机电流内环控制结构如图2所示^[18]。

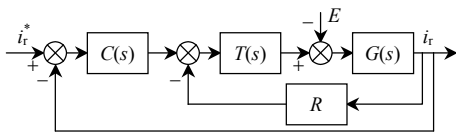


图2 引入虚拟电阻双馈发电机电流内环控制结构

Fig. 2 Block diagram of the current control system based on virtual resistor

电流环被控对象的传递函数 $G(s)$ 表述为

$$G(s) = \frac{K_g}{T_g s + 1} \quad (11)$$

式中: $K_g = 1 / (R_r + R_s L_m^2 / L_s^2)$; $T_g = \sigma L_r / (R_r + R_s L_m^2 / L_s^2)$ 。

引入虚拟电阻前,电流内环控制系统的扰动传

递函数为

$$G_{EI}(s) = \frac{i_r(s)}{E(s)} = \frac{s}{(s + \alpha_c) \left(\frac{T_g}{K_g K_t} s + \frac{1}{K_g K_t} \right)} \quad (12)$$

式中 α_c 为电流内环带宽,

引入虚拟电阻后,电流内环的扰动传递函数为

$$G'_{EI}(s) = \frac{i_r(s)}{E(s)} = \frac{s}{(s + K_c) \left(\frac{T_g}{K_g K_t} s + \frac{1}{K_g K_t} + R_a \right)} \quad (13)$$

采用虚拟电阻的控制方式虽然能够抑制电网电压骤升时转子电流、电磁转矩的振荡,提高双馈发电机转子侧阻尼,但是随着虚拟电阻的增加将致使转子电压增加,同时也将影响双馈发电机的暂态响应过程。在低频区域具有较强的扰动抑制作用,而在高频区域,其不具有扰动抑制特性。

双馈发电机定、转子磁链方程式为

$$p \begin{bmatrix} \psi_{sq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{a} R_s L_r & -\omega_s & \frac{1}{a} R_s L_m & 0 \\ \omega_s & -\frac{1}{a} R_s L_r & 0 & \frac{1}{a} R_s L_m \\ \frac{1}{a} R_r L_m & 0 & -\frac{1}{a} R_r L_s & -s \omega_s \\ 0 & \frac{1}{a} R_r L_m & s \omega_s & -\frac{1}{a} R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{rd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sq} \\ u_{sd} \\ u_{rq} \\ u_{rd} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 $a = L_s L_r - L_m^2$ 。

可以推出定、转子磁链特征值实部、虚部随转子电阻的变化如图3所示。

由图可以看出:随着转子电阻的增加,转子磁链特征值的实部变大,远离虚轴,虚部基本不变;定子磁链特征值的实部变小,靠近虚轴,虚部也基本不变。这表明转子侧的阻尼变大,转子磁链直流分量的衰减速度变快,而定子侧的阻尼变小,定子磁链直流分量衰减速度减慢。随着定子对转子的耦合增强,将对电网电压骤升过程中转子电流的动态过程产生影响。随着转子虚拟电阻的增加,转子所需要的电压也将增加,动态过程也将加长。图3(c)、(d)为定、转子磁链特征值实部、虚部随转子电感变化的趋势图,可以看出:随着转子电感的增加,转子磁链特征值的实部变大,远离虚轴,虚部基本不

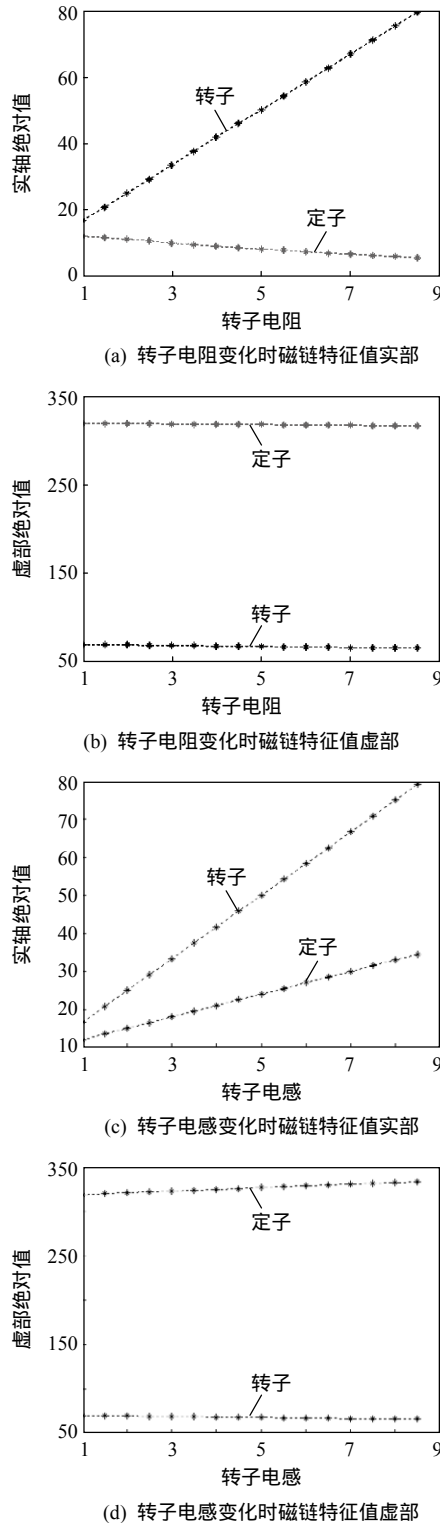


图 3 定、转子磁链特征值

Fig. 3 Stator and rotor flux eigenvalue

变；定子磁链特征值的实部也变大，远离虚轴，虚部基本不变。表明增加转子侧电感后，定子侧的阻尼变大，定子磁链直流分量衰减加快，当电网电压骤升时，定子磁链直流分量耦合到转子侧的转速频率的交流分量衰减加快，使得电网电压骤升时转子电流的振荡过程减小。

虚拟电阻就其本身而言，依然是电阻特性，其动态抗扰能力受到较大限制，而虚拟电阻的进一步增大会对双馈发电机的稳态运行产生较大的影响。而且针对高频扰动情况，漏电感的存在使得虚拟电阻对动态扰动的改善作用较小。考虑到稳态情况下双馈发电机转子侧电流的频率通常较小，因此可以在串联虚拟电阻的基础上，再串入虚拟电感形成虚拟阻抗，虚拟电感的引入将进一步抑制反电动势对双馈发电机转子电流的扰动作用，特别对高频动态扰动的抑制能力加强，同时虚拟电感对双馈发电机的稳态运行特性的影响较小。图 4 为基于虚拟阻抗的双馈发电机控制策略结构图。

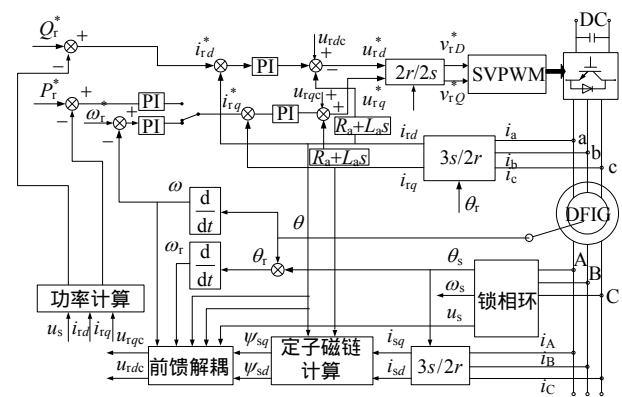


图 4 基于虚拟阻抗的双馈发电机控制结构

Fig. 4 Block diagram of the DFIG control system based on virtual impedance

由图 5 可得采用虚拟阻抗后，电流内环被控对象的传递函数变为

$$G_p''(s) = \frac{K_g K_t}{1 + R_a K_g K_t} \frac{1}{\frac{T_g + L_a K_g K_t}{1 + R_a K_g K_t} s + 1} \quad (15)$$

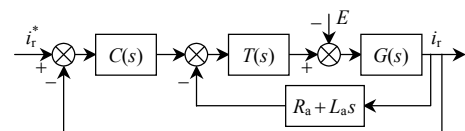


图 5 引入虚拟阻抗的双馈发电机电流内环控制结构

Fig. 5 Block diagram of the current control system based on virtual impedance

引入虚拟阻抗后，电流内环控制系统的扰动传递函数为

$$G_{El}'' = \frac{K_g K_t s}{(s + K_c)[(T_g + L_a K_g K_t)s + (1 + R_a K_g K_t)]} \quad (16)$$

通过调节虚拟阻抗值的大小可以得到较为理想的频域特性，图 6 为常规控制、虚拟电阻、虚拟

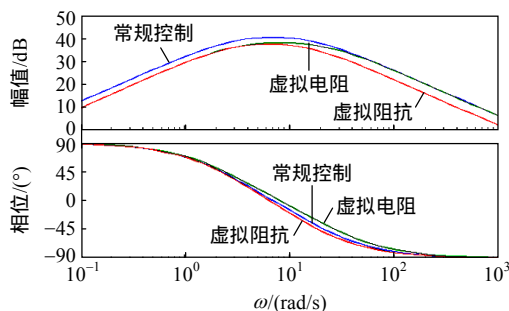


图6 引入虚拟阻抗前后反电动势到转子电流的伯德图

Fig. 6 Bode graph of the disturb transfer function based on virtual impedance

阻抗时所对应的反电动势扰动项到转子电流的幅频特性和相频特性。由图6可以看出：与常规控制相比，虚拟电阻控制在低频部分具有较强的扰动抑制作用；然而在高频区域，虚拟电阻控制与常规控制具有相同的扰动抑制特性，而虚拟阻抗控制在高频区域依然具有较好的抗扰作用，而且保持其低频区域与虚拟电阻几乎具有相同的扰动抑制特性。图7为引入虚拟阻抗前后扰动函数阶跃响应。

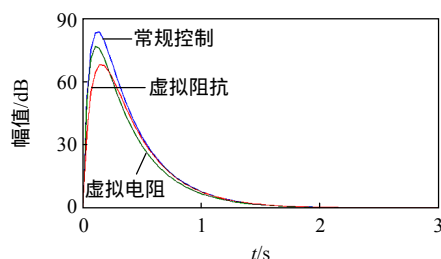


图7 引入虚拟阻抗前后扰动函数阶跃响应

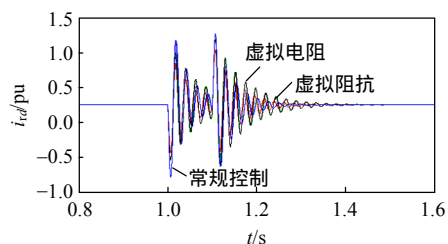
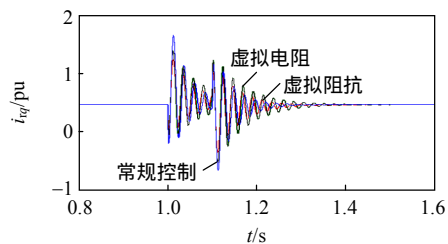
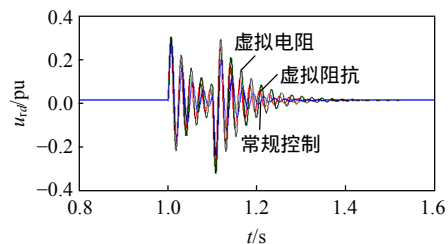
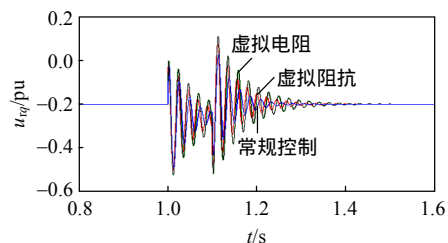
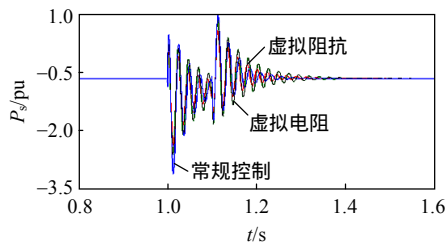
Fig. 7 Step response of the disturb transfer function based on virtual impedance

3 仿真分析与实验结果

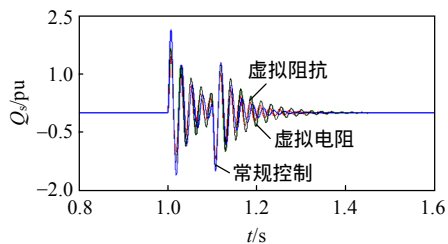
为了验证理论分析的正确性，本文以2 MW双馈发电机参数为例进行了仿真研究。首先利用Matlab/Simulink搭建了双馈风力发电机侧变流器仿真模型，双馈发电机的参数：定子额定电压为690 V，定子额定电流为1 400 A；转子开路电压为2 000 V，转子额定电流为550 A；极对数 $n_p=2$ ；定子自感 $L_s=0.0125$ H，转子自感 $L_r=0.0126$ H，互感 $L_m=0.0123$ H；定子绕组电阻 $R_s=0.0043$ Ω，转子绕组电阻 $R_r=0.0041$ Ω。其中，虚拟阻抗参数 R_a 和 L_a 必须满足转子侧变流器输出的电压、电流不超过功率模块允许的安全范围，即 $I_r \leq I_{rmax}$ 、 $U_r \leq U_{rmax}$ ， I_{rmax} 和 U_{rmax} 分别为转子侧变流器所允许的电流、电压最大值。

图8为电网电压骤升幅度为1.3 pu、故障持续

时间100 ms，分别采用无虚拟电阻控制、有虚拟电阻控制、虚拟阻抗控制时的转子电流 dq 轴分量、转子 dq 轴电压分量、定子有功无功功率、电磁转

(a) 转子 d 轴电流分量(b) 转子 q 轴电流分量(c) 转子 d 轴电压分量(d) 转子 q 轴电压分量

(e) 定子有功功率



(f) 定子无功功率

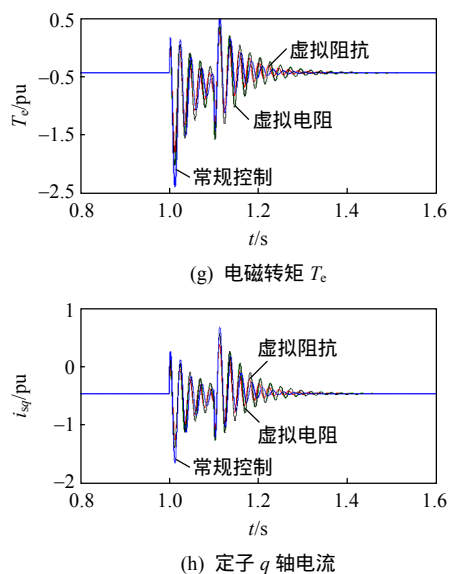


图 8 电网电压骤升时有无虚拟阻抗对比

Fig. 8 Transient behavior of DFIG with and without virtual impedance

矩 T_e 和定子 q 轴电流的仿真波形。其中, 虚拟电阻为 2 pu , 虚拟电感为 0.5 pu 。可以看出: 分别采用虚拟电阻和虚拟阻抗控制时, 电网电压骤升对转子电流、电磁转矩、定子有功和无功、定子电流都有抑制作用, 但所需的转子电压都比较大, 过渡过程也加长了; 在对电网电压骤升时的转子电流峰值抑制效果相同的条件下, 采用虚拟阻抗控制时所需的转子电压要比采用虚拟电阻控制时所需的转子电压要小, 且过渡时间短。

在 11 kW 变速恒频双馈风力发电模拟平台上对上述控制策略进行了实验验证。该平台用变频器驱动一台三相鼠笼式异步电动机在实验室条件下模拟运行于风场中的风力机, 并采用基于变压器抽头跳变的电网电压骤升模拟器。该模拟平台中的双馈发电机为一台绕线式感应电动机, 其参数为: 额定功率为 11 kW , 额定转速为 1475 r/min , 定子 $380 \text{ V}/17.6 \text{ A}$, 转子 $858 \text{ V}/8.1 \text{ A}$; 定子电阻 $R_s = 0.2858 \Omega$, 转子电阻 $R_r = 0.2983 \Omega$, 定子漏抗 $L_s = 0.001323 \text{ H}$, 转子漏抗 $L_r = 0.001781 \text{ H}$, 励磁电抗 $L_m = 0.0676 \text{ H}$ 。

图 9—11 为电网电压三相对称骤升 1.3 pu 、故

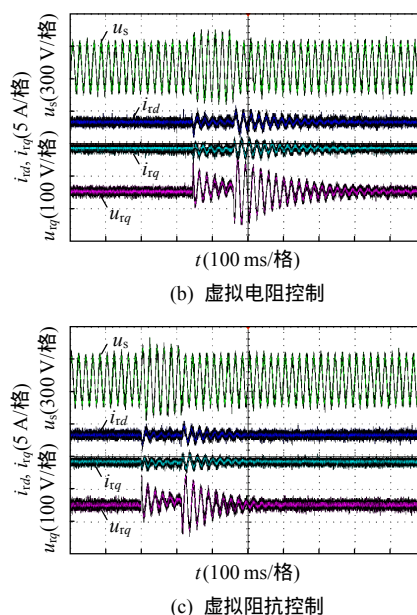
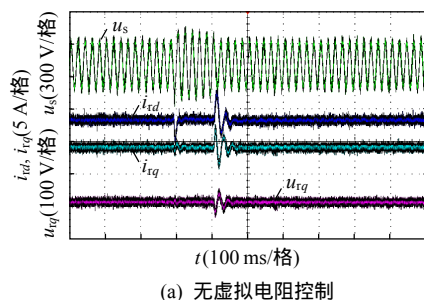


图 9 次同步转速下无虚拟电阻、虚拟电阻、虚拟阻抗时转子电流、电压

Fig. 9 Rotor current and voltage with and without virtual impedance in sub-synchronization

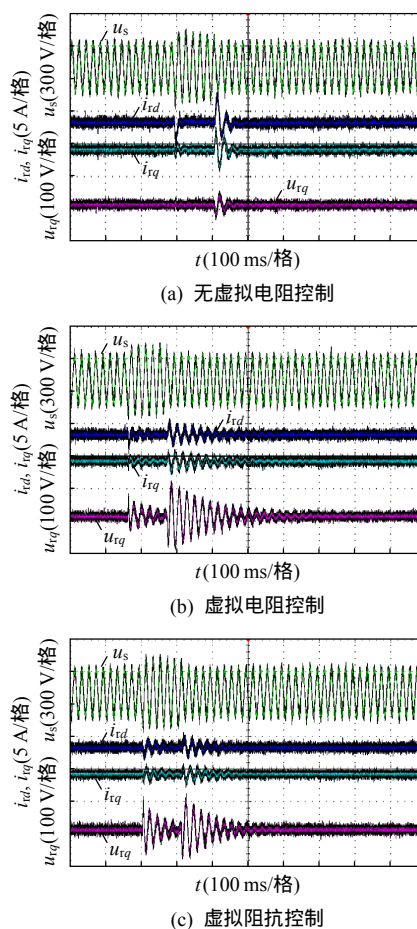


图 10 同步转速下无虚拟电阻、虚拟电阻、虚拟阻抗时转子电流、电压

Fig. 10 Rotor current and voltage with and without virtual impedance in synchronization

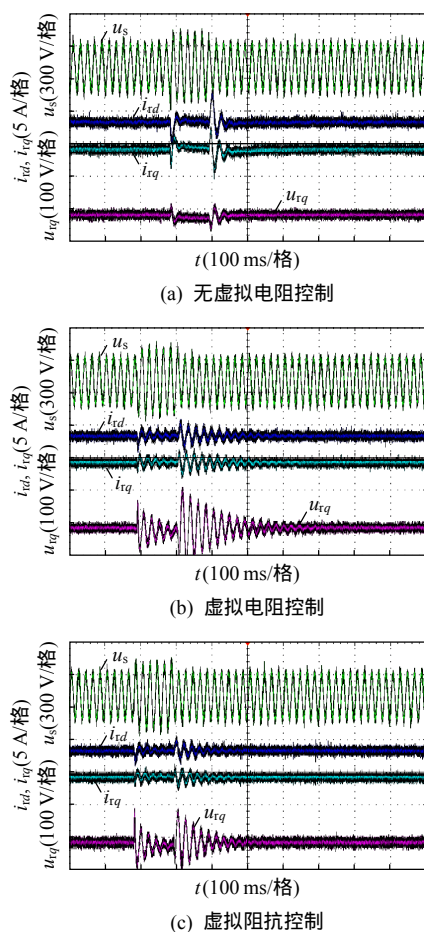


图 11 超同步转速下无虚拟电阻、虚拟电阻、虚拟阻抗时转子电流、电压

Fig. 11 Rotor current and voltage with and without virtual impedance in super-synchronization

故障持续时间为 100 ms，无虚拟电阻、有虚拟电阻、虚拟阻抗情况下，双馈电机分别运行于次同步、同步以及超同步时的转子电流 d 轴分量 i_{rd} 、转子电流 q 轴分量 i_{rq} 以及转子 q 轴电压的实验波形。其中，虚拟电阻为 3 pu，虚拟电感为 1.5 pu。

由图 9—11 可以看出：加入虚拟阻抗后，控制系统对电网电压骤升所造成的转子电流振荡的抑制能力也随之增强；电网电压恢复时转子电流的振荡幅度比电网电压骤升时转子电流的振荡幅度要大，这主要是由故障所持续时间和电网电压的恢复时刻造成的，若故障切除时刻，电网电压骤升时所激起的电磁振荡过程还没有结束，则电网恢复时所激起的振荡过程将会叠加在前一振荡过程之上；并且超同步运行比次同步运行所造成的转子电流振荡幅度更大。虽然转子电流的振荡得到了抑制，但是转子电压却变大了。

由图 9—11 还可看出：加入虚拟电阻后，电网电压骤升时转子电流的过渡过程比无虚拟电阻控

制时要长，加入虚拟阻抗控制后，对电网电压骤升所造成的转子电流振荡也具有抑制能力，并且转子电流的过渡过程要比加虚拟电阻时要短。转子电压也有所增加，但是比虚拟电阻控制低。

4 结论

本文对电网电压骤升过程中双馈发电机的电磁暂态进行了分析，将基于虚拟电阻的有源阻尼控制引入到双馈发电机转子励磁控制中，并提出了基于虚拟阻抗的改进控制策略。研究表明：基于虚拟阻抗的控制方式能够抑制电网电压骤升故障所造成的转子电流振荡，减小了 HVRT 过程中电磁转矩的振荡对系统的影响，与采用虚拟电阻控制相比，减少了电网电压骤升时的过渡过程，有效提高了双馈风力发电系统的 HVRT 控制性能，为大功率双馈风力发电的高电压穿越技术的研究提供了参考。

参考文献

- [1] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 85-91.
Yang Shuying, Zhang Xing, Zhang Chongwei, et al. Electro-magnetic transition of doubly fed wind turbines initiated by voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 85-91(in Chinese).
- [2] 苑国锋, 柴建云, 李永东. 变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 90-94.
Yuan Guofeng, Chai Jianyun, Lin Yongdong. Study on excitation converter of variable speed constant frequency wind generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 90-94(in Chinese).
- [3] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制与建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43-50.
Liu Qihui, He Yikang, Zhang Jianhua. Operation control and modeling simulation of AC excited variable speed constant frequency wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 43-50(in Chinese).
- [4] 周宏林, 杨耕. 不同电压跌落深度下基于撬棒保护的双馈式风机短路电流特性分析[J]. 中国电机工程学报(增刊), 2009, 29(s): 184-191.
Zhou Honglin, Yang Geng. Short circuit current characteristics of doubly fed induction generator with crowbar protection under different voltage dips[J]. Protection. Proceedings of CSEE, 2009, 29(s): 184-191(in Chinese).

- [5] 郑艳文, 李永东, 柴建云, 等. 不平衡电压下双馈发电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 89-93. Zheng Yanwen, Li Yongdong, Chai Jianyun, et al. Research on control strategy for doubly-fed generation system under unbalanced voltage condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 89-93(in Chinese).
- [6] 李建林, 许鸿雁, 梁亮, 等. VSCF-DFIG 在电压瞬间跌落情况下的应对策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 65-68. Li Jianlin, Xu Hongyan, Liang Liang, Zhao et al. Strategy to cope with the VSCF-DFIG during voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 65-68(in Chinese).
- [7] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 29-36. Xu Dian-guo, Wang Wei, Chen Ning, Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of CSEE, 2010, 30(22): 29-36(in Chinese).
- [8] 胡家兵, 贺益康, 王宏胜, 等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机转子侧变换器的比例-谐振电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 48-56. Hu Jiabing, He Yikang, Wang Hongsheng, et al. Proportional resonant current control scheme for rotor side converter of doubly fed induction generator under unbalanced network voltage conditions[J]. Proceedings of CSEE, 2010, 30(6): 48-56(in Chinese).
- [9] 廖勇, 李辉, 姚骏, 等. 采用串联网侧变换器的双馈风电机组低电压过渡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009(9), 29: 90-98. Liao Yong, Li Hui, Yao Jun, et al. Low voltage ride-through control strategy of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid-side converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009(9) 29: 90-98(in Chinese).
- [10] 中国电力科学研究院. 风电场接入电网技术规定(修订版)[S]. 北京: 国家电网公司, 2009. China Electric Power Research Institute. Regulations on accessing power system technology to wind electric field in state grid(Revised Edition)[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2009(in Chinese).
- [11] E. ON Netz. Grid Code for high and extra high voltage[S]. Bayreuth, Germany: E. ON Netz GwBH, 2006.
- [12] 国家电力监管委员会. 关于近期三起风电机组大规模脱网事故的通报[R/OL]. [2011-05-06]. http://www.serc.gov.cn/ywdd/201105/t20110506_14631.htm. State Electricity Regulatory Commission. On the recent three wind turbine mass and accident notification[R/OL]. [2011-05-06]. http://www.serc.gov.cn/ywdd/201105/t20110506_14631.htm.
- [13] Australian Energy Market Commission. National electricity rules[R/OL]. [2008-10-21]. <http://www.aemc.gov.au>.
- [14] Eskander M N., Amer S I. Mitigation of voltage dips and swells in grid-connected wind energy conversion systems[C]//Proceedings of the ICROS-SICE International Joint Conference. Fukuoka, Japan: IEEE, 2009: 885-890.
- [15] Wessels C, Fuchs F W. High voltage ride through with FACTS for DFIG based wind turbines[C]//Proceedings of 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-10.
- [16] Feltes C, Fortmann J, Erlich I, et al. High voltage ride through of DFIG based wind turbines[C]//Proceedings of 2008 IEEE Power Energy Society General Meeting. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [17] Liu Changjin, Huang Xiaobo, Chen Min, et al. Flexible control of DC-link voltage for doubly fed induction generator during grid voltage swell[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010: 3091-3095.
- [18] 谢震, 张兴, 宋海华, 等. 电网电压骤升故障下双馈风力发电机变阻尼控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 39-45. Xie Zhen, Zhang Xing, Song Haihua, et al. Control Strategy of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine Based On Variable Damping Under Grid Voltage Swell [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 39-45(in Chinese).
- [19] Mohsen Rahimi, Mostafa Parniani. Grid fault ride through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators[J]. Electric Power System Research 2010, 80(2): 184-195.
- [20] Petersson A, Harnfors L, Thiringer T. Evaluation of current control methods for wind turbines using doubly-fed induction machines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1): 227-235.



谢震

收稿日期: 2012-03-15。

作者简介:

谢震(1976), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大功率风力发电用并网变流器, ppsd2003xie@sina.com;

张兴(1963), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大功率风力发电用变流器及大型光伏并网发电;

杨淑英(1980), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为风力发电及电机驱动控制。

(责任编辑 张玉荣)

High Voltage Ride-through Control Strategy of Doubly Fed Induction Wind Generators Based on Virtual Impedance

XIE Zhen, ZHANG Xing, YANG Shuying, SONG Haihua, QU Tingyu

(Hefei University of Technology)

KEY WORDS: wind power generator; doubly fed induction generator (DFIG); virtual impedance; high voltage ride through (HVRT)

With the rapid increase of wind farms, it forced the grid operators to change the grid code for wind farms, limiting its impact on grid stability. Doubly fed induction generator is largely used in wind turbines, but it is very sensitive to grid disturbances. The voltage swell can be caused by switching on capacitor banks or switching off large loads, which may result in the reversal of the power flow in the grid convertor, the current may flow from the grid into the DC-link, which may result in the DC-voltage rising, and may result in large fault rotor currents and instantaneous power oscillation. The grid reactive compensation devices can not have the automatic switching function after the low voltage fault, which will result in local reactive power surplus, so some wind power generators will retreat from the grid under high voltage protection. In Australia, grid code stipulate wind farms to withstand an overvoltage of 1.3 pu for 60 ms. The high voltage ride through capability of wind turbines with doubly fed induction generators must be implemented.

In this analysis, the stator flux is divided into two components, the natural flux and the forced flux. The forced flux rotates at synchronous speed, which induces a voltage in the rotor proportional to the slip, the natural flux is a transient flux, which appears during the voltage swell. The most popular and reliable way is to apply a crowbar during the voltage swell, but it will result in a high generator torque and uncontrolled active and reactive power.

The active resistance can not only suppress rotor current, but also reduce torque oscillation during voltage

swell, but with the active resistance increasing, it results in lower damping of stator modes, and can result in oscillatory transient response with longer settling time, and can result in higher rotor voltage than the conventional control. so it will influence the dynamic behavior of doubly-fed induction wind generators during the voltage swell. So the control strategy of virtual impedance is proposed for high voltage ride through of doubly-fed induction wind generators, which can not only lower the peak rotor fault current and the instantaneous power oscillation, but also reduce the rotor voltage during the voltage swell, and shorten the oscillation transient time, and suppress the high frequency component. The control strategy can improve the dynamic behavior of DFIG during the voltage swell. Fig.1 is the block diagram of the DFIG control system based on virtual impedance. Simulations and experimentation results showed that the proposed control strategy is more efficient than the active resistance, which can improve the performance of high voltage ride through for the doubly-fed induction wind generators.

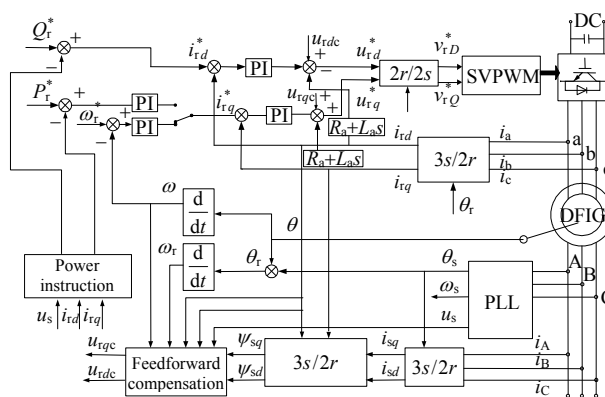


Fig. 1 Block diagram of the DFIG control system based on virtual impedance